

YANAL YÜKLÜ BİR MODEL KAZIĞIN KUM ORTAMINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Niyazi Uğur TERZİ*, Havvanur KILIÇ**, Sami GÜLTEKİN***

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34600, İstanbul
ELC Group Müşavirlik ve Mühendislik LTD. Kavacak, İstanbul

Geliş Tarihi : 03.09.2008

Kabul Tarihi : 16.03.2009

ÖZET

Bu çalışmada, farklı kum ortamlarında yerleştirilmiş olan bir kazık modelinin yanall yüklemeler altındaki gerilme-şekil değişime ve yerdeğiştirme davranışı incelenmiştir. Laboratuvar ortamında yürütülen çalışmada, dairesel bir alüminyum kazık, deney kutusu, yükleme düzeneği, yer değişimi ve şekil değişimi ölçerler kullanılmıştır. Yağmurlama sistemi kullanılarak eşdeğer sıklık ve homojen bir dolgu ortamı oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarda model kazığın kademeli yüklemeler altındaki gösterdiği davranışı deneysel olarak saptanmıştır ve daha sonra kazık davranışı, tasarımcılar tarafından yaygın olarak kullanılan p-y ve yatak katsayısı yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Nümerik çalışmalar LPILE ve SAP 2000 programlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, p-y yönteminin yatak katsayısı yönteminden daha güvenilir sonuçlar ortaya koyduğu saptanmıştır. Kumun sıklık derecesinin zemin reaksiyonu üzerindeki etkisi görülmüştür. Son olarak ölçüm aygıtlarının kalibrasyonunda kullanılan Daley yönteminin güvenilir olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Yanal yüklü tekil kazık, p-y yöntemi, Yatak katsayısı yöntemi, Laboratuvar deneyi.

INVESTIGATION OF A LATERALLY LOADED MODEL PILE BEHAVIOUR IN SAND BY MEANS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

ABSTRACT

In this study, stress-strain relation and deformation behavior of laterally loaded pile which is located in different sand embedment is investigated. A circular aluminum pile, test box, loading system, strain gauge rosettes and linear position transducers were used in the laboratory test. Uniform relative density and homogeneous embedment medium in the test box were achieved by using sand pluviation system. The behavior of aluminum pile loaded incrementally at its head is obtained experimentally and then p-y method and subgrade reaction method which is commonly used by designers are employed to model the numerical behavior of the pile. Numerical studies were performed by using LPILE and SAP 2000 computer programs. Based on the findings, the p-y method estimates the pile head deflection more accurately than subgrade reaction method particularly high lateral deflections of pile head. The experimental test studies show that relative density of sand embedment is very effective on occurrence of soil reaction. Finally the reliability of Daley calibration method which is used in instrumentation was evaluated.

Keywords : Laterally loaded single pile, p-y method, sub-grade reaction method, Laboratory test.

1. GİRİŞ

Yanal yüklü kazıklar; liman yapılarında, su akımına maruz kalan köprü ayaklarında, şev stabilitesi problemi olan bölgelerdeki istinat yapılarında, sismik yüklere maruz kalabilecek binaların temellerinde, yanal yükler taşıyan kule, vinç köprü ayakları ve yüksek yapıların (rüzgar enerjisi değirmenleri, reklam panoları vb.) temellerinde kullanılırlar. Düşey yükler altında çalışan kazıklar üzerinde yapılan uzun süreli çalışmalar sayesinde basit matematiksel yaklaşımlar ile güvenilir tasarımlar yapmak mümkündür. Ancak, yanal yüklü kazıklar konusunda genel kabul görmüş bir tasarım modelinin varlığından söz etmek mümkün değildir. Bunun en büyük nedeni, yanal yüklü kazıkların deplasmana maruz kalmalarından itibaren yüzey alanları boyunca üç boyutlu bir zemin-yapı etkileşimi altında davranış göstermeleridir. Bu bakımdan yanal yüklü kazıkların davranışlarının hesaplanmasında bir çok kabul kullanılmaktadır. Günümüzün pratik uygulamalarında yanal yüklü kazıkların yük altındaki davranışları ve deformasyon kestirimleri için; yatak katsayısı yöntemi, “p-y” yöntemi, elastik analiz yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmaktadır. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın yanal yüklü kazıkların tasarım yöntemlerinde tasarımcının şu üç koşulu sağlaması gereklidir.

- Kazığa etkiyen yanal yükler altında eğilme ve göçmeye karşı yeterli bir güvenlik sayısı ile çalışmalıdır.
- Yanal yük etkisinde temelde oluşacak yer değiştirme büyüklüğü üst yapı için kabul edilebilir aralıkta kalmalıdır.
- Kazık çevresinde bulunan zeminin, yük altında göstereceği kayma mukavemeti büyüklüğü göz önünde tutularak zeminin göçme sınırını aşmayacak bir yük aralığı seçilmeli veya kazık boyu ve kazık kesiti buna göre boyutlandırılmalıdır.

(Parakash, 1962; Neill ve Murchison, 1983; Brown v.d., 1988; Franke, 2001; Mokwa ve Duncan, 2001; Huang ve O’Neill, 2003; Kumar ve Lalvani, 2004; Kayis, 2006) ve (Fan ve Long, 2005) gibi araştırmacılar tarafından kazık davranışını aydınlatmak için arazi ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada kum ortamına yerleştirilmiş alüminyum bir kazık modeline tekil bir yanal yük uygulanmış ve kazık başında meydana gelen yanal deplasmanlar ve yük-gerilme dağılımı değerlendirilmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmada kazık iç çeperine yapıştırılan 7 adet şekil değişimi ölçer ve kazık başına yerleştirilen LPT (doğrusal pozisyon ölçer) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada dolgu malzemesi olarak kötü derecelendirilmiş Şile kumu kullanılmıştır. Şile kumu yağmurlama sisteminden yararlanılarak deney kutusuna eşdeğer sıklık ve homojen özellikte yerleştirilmiştir. Yerinde imal edilmiş fore kazık davranışının incelenmesi amaçlanmış ve bu amaçla deney kutusuna önce kazık modeli konumlandırılmış daha sonra ise dolgu malzemesi yağmurlanmıştır. Kazık başından 0.01 kN dan 0.15 kN kadar kademeli olarak noktasal yanal yükleme uygulanmıştır. Deney koşulları, yükleme adımları ve kazık özellikleri “p-y” ve yatak katsayısı yöntemlerini temel alan LPILE ve SAP 2000 programları ile modellenerek analizleri yapılmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yanal yüklü kazıkların tasarımında yatak katsayısı ve p-y yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda gelişen bilgisayar yazılımları sayesinde, sonlu elemanlar yöntemi de tasarımcılar tarafından dikkate alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yaygın olarak kullanılan p-y ve yatak katsayısı yöntemlerinin kazık davranışını belirlemedeki yetkinliği, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

2. 1. Yanal Yatak Katsayısı Yöntemi

Yatak katsayısı yönteminde, elastik zemin ortamına yerleştirilmiş tekil bir kazık öngörülür. Zemin birbirinden bağımsız yaylarla modellenir ve kazığın düşey bir kiriş gibi şekil değiştirdiği kabul edilir. Kazık boyunca gereken nihai zemin direnci için zemin basıncı kuramı gibi tasarımcıların kullanımını kolaylaştıran varsayımlar dikkate alınır. Yöntem kısa ve uzun kazıklar için kullanılabilirken, tabakalı zemin ortamlarında uygulanamaz. Yöntemde, kohezyonlu zeminler, kohezyonsuz zeminler, kısa kazıklar ve uzun kazıklar olmak üzere analiz yöntemleri ayrı ayrı değerlendirilir. Yatak katsayısı yönteminde; kazık ötelenmesi “y”, ise, kazık davranışı

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada;

E; Kazığın Elastik Young Modülü
 I; Atalet Momenti
 y ; x derinliğindeki yanal deplasmanı
 k_h ; Yanal Yatak Katsayısı değerleridir.

Yanal yatak katsayısının zemin ortamında derinlikle birlikte arttığı düşünülürse;

$$k_h = n_h x \quad (2)$$

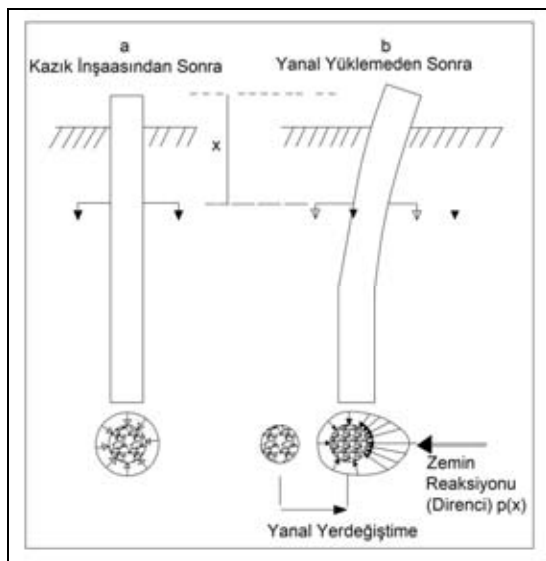
olarak ifade edilebilir. Eşitlikte yer alan n_h (kN/m^3) yatak katsayısı sabitinin kumlu zeminler için alacağı değerler (Terzaghi, 1955) tarafından belirlenmiştir. Gevşek, orta sıkı ve Sıkı zeminler için n_h değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kumlar için n_h (kN/m^3) değerleri.

Kum	Gevşek	Orta	Sıkı
Kuru	1800-2200	5500-7000	15000-80000
Suya Doygun	1000-1400	3500-4500	9000-12000

2. 2. p-y Yöntemi

Zeminin birbirinden bağımsız yaylarla modellenmesi zeminin temel kuramlarına aykırı bir yaklaşımdır. Çünkü zemin elastik özellikleri yanında plastik özelliklere de sahiptir ve bu niteliğinin analizlerde göz önünde tutulması gereklidir. Yanal yüklü kazıkların analizlerinde bu durum; (Matlock ve Reese, 1960) gibi araştırmacılar tarafından dikkate alınmıştır. Yöntemde zeminin plastik özellikleri oluşturulan “p-y” eğrileri ile çözüme dahil edilir. Şekil 1’de görülen şekilde “y” ötelenmesi ile zeminde oluşan reaksiyon kuvvetleri birbirleri ile ilişkilendirilerek analizler yapılır.



Şekil 1. Zemin reaksiyonunun oluşumu.

Şekil (1a)’da zemin içerisindeki dairesel kesitli bir kazık gösterilmiştir. Yatay yüklemelerden önce kazık etrafındaki zeminin reaksiyon kuvveti dağılışı Şekil (1a)’da görüldüğü gibidir. Kazığın “y” yerdeğiştirmesi yapması durumunda kazık arkasındaki gerilme azalmakta ve ön kısımda artmaktadır. Bu durumda kazığın birim uzunluğu için “p” kuvveti oluşur ve kuvvet etkisi ile kazık kesitinde kesme ve eğilme momentleri meydana gelir. Burada, “y”; kazığın yanal yüklemesiyle yatay yönde oluşan yanal yer değiştirme “p”; kazığın yer değiştirmesi sonucu kazığa karşı zeminde ortaya çıkan ve kazık birim uzunluğuna etkiyen reaksiyon kuvvetidir. Yanal olarak yüklenmiş kazıkların lineer elastik gibi davrandığı varsayımının yapıldığı durumun diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibidir.

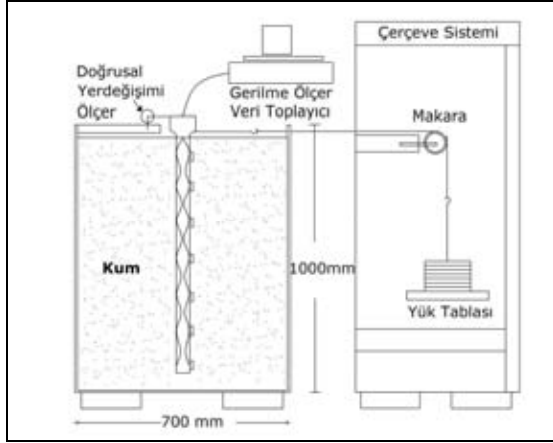
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3)$$

Burada, EI ;kazığın rijitliği, y; “x” derinliğindeki kazık yatay yer değiştirmesi, P; kazık başındaki keskenel yükü, p; ise birim uzunluk için zemin reaksiyonudur. Kazık yer değişimi “x” ve “y” ye bağlı olarak eşitliğin çözümünden elde edilir. Zeminin elasto-plastik davranışının nümerik açıklamasını en iyi şekilde zemin reaksiyonunun ve şekil deyiştirmenin bir fonksiyonu olarak tanımlayan “p-y” eğrileri sağlayabilir. Eğriler zemin direnci ve yük tekrar sayısı gibi bir çok değişkene bağlıdır. Bu yüzden farklı zemin ve kazık özellikleri için “p-y” eğrilerinin tahmin edilmesi gereklidir.

3. LABARATUVAR ŞARTLARI

Deneysel çalışmalar; 500 mm genişlik 700 mm en ve 1000 mm boy ölçülerindeki Şekil 2’de görülen deney kutusunda gerçekleştirilmiştir (Gültekin, 2001). Deney kutusunun yan duvarlarında cam kullanılmıştır. Bu sayede geri dolgu malzemesinin yerleştirilme süreci ve kum dolgusunda oluşan yer deyiştirmeler gözlemlenebilmiştir. Bununla birlikte kum ile cam malzeme arasındaki 5° ’den daha az olan sürtünme açısı deney koşullarındaki önemli bir problem olan sınır koşulu ve ara yüzey sorununu aşmaya yardımcı olmuştur.

Denyede kullanılan kum dolgusunun deney kutusuna eşdeğer özellikte ve sıklıkta yerleştirilebilmesi için yağmurlama düzeneğinden yararlanılmıştır. Şekil 3’de gösterilen yağmurlama düzeneğinde, elek tabakaları, kum haznesi ve yükseklik ayarı yer almaktadır. Hedeflenen sıklık değerleri için deyiştirilen elek plakaları ile kum elenmekte ve deney kutusu içerisinde homojen bir dolgu ortamı oluşturulabilmektedir.



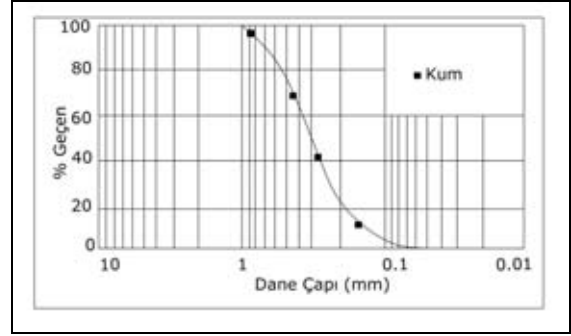
Şekil 2. Deneysel düzeneği.



Şekil 3. Yağmurlama sistemi.

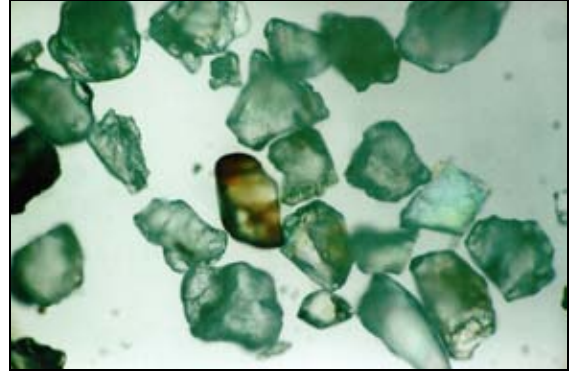
3. 1. Zemin ve Model Kazığın Özellikleri

Özellikle yağmurlama sistemlerinin kullanıldığı laboratuvar deneylerinde, dolgu malzemesinin kolay elenebilmesi ve kayma mukavemeti özelliklerinin eşdeğer nitelikte olabilmesi için kötü derecelenmiş zeminler kullanılır. Bu çalışmada; İstanbul, Şile kum ocaklarından temin edilmiş olan Şile Quartz kumu kullanılmıştır. Dolgu kumunun özgül ağırlığını belirlemek için TS 1900 dikkate alınarak özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Üç adet özgül ağırlık deneyinden elde edilen ortalama değer 2.657 olarak bulunmuştur. Şile kumunun en büyük ve en küçük boşluk oranları (Adalier, 1992) yöntemi kullanılarak saptanmış ve sırasıyla, 0.87 ve 0.52 olarak bulunmuştur. Şile kumuna ait granülometri eğrisi Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Şile kumuna ilişkin granülometri eğrisi.

Detaylı laboratuvar çalışmalarında zemine ilişkin makro özelliklerinin bilinmesi ve saptanması gereklidir. Ancak bu yeterli değildir, çünkü kayma mukavemetini oluşturan temel niceliklerden birisi zemin danelerinin makro özellikleri iken bir diğeri mikro özellikleridir. Bu bakımdan bu türden çalışmalarda olduğu gibi zemine ilişkin mikro özelliklerinin de dikkate alınması gereklidir. Bu amaçla söz konusu çalışmada Şile kumunun mikro özellikleri incelenmiştir. Şekil 5’te kum danelerinin mikroskop ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5. Kum danelerinin şekli.

Mikroskobik çalışmalar yanında kuma ilişkin kimyasal özelliklerin saptanması ve bileşenlerinin tayini çalışmaları da yürütülmüştür. Kuma ilişkin kimyasal bileşenleri yapılan X-Ray deneyleri ile saptanmıştır. Tablo 2’de X-Ray deney sonuçları verilmektedir.

Tablo 2. Zeminin kimyasal bileşenleri.

Bileşenler	%
SiO ₂	97
Fe ₂ O ₃	14
Al ₂ O ₃	-
KAlSiO ₃	11
CaO	-
MgO	0,5

Deneyde 22 mm çapında içi boş kesitli alüminyum boru kullanılmıştır. Boru et kalınlığı 1.25 mm'dir. Şekil 2'de büyütülmüş ölçekle çizimi yapılan borunun uzunluğu 750 mm olarak seçilmiştir. Kazık üzerinde yapılan üç farklı çekme deneyinden elde edilen Akma Gerilmesi(kN/m²) ve Akma Momenti (kNm) değerleri Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3 Model kazığın çekme deneyi sonuçları.

Akma Yüğü (kN)	Akma Ger. (kN/m ²)	Akma Mom (kNm)
13.8	169000	6.77 x 10 ⁻²
12.6	154000	6.16 x 10 ⁻²
12.8	157000	6.28 x 10 ⁻²

Yanal yüklü kazıkların davranışında zemin ortamı, yükleme şekli, kazık boyutları gibi etkenlerin yanında kazığın esnek yada rijit davranış göstermesi de etkilidir. Bu davranış şekli kazığın göreceli olarak uzun veya kısa kazık özelliklerinde olmasına bağlıdır. Kazığın uzun yada kısa olduğu (Broms, 1964)'un ortaya koyduğu aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (4)$$

Burada, E_p , kazığın elastisite modülü (6.9x10⁷ kPa), I_p atalet momenti (4.4 x 10⁻⁹ m⁴) ve n_h yatak katsayısı çarpanıdır (sıkı zeminler için 15000). Eşitlikteki T değerine göre sonuç 2T den az olduğunda kısa kazık, 4T den büyük olduğunda ise uzun kazık olarak kabul edilir. Bu çalışmadaki alüminyum kazık modeli elastik ve uzun kazık olarak davranış göstermektedir.

3. 2. Kullanılan Kalibrasyon Yöntemi

Özel yapıştırıcılar ve silikon koruyucular kullanılarak kazık boyuca 10 cm aralıkla yapıştırılan gerilme ölçerlerin kalibrasyonu (Daley ve Riley, 1978)'in ortaya koyduğu aşağıdaki eşitlik ile gerçekleştirilmiştir.

$$CF = (1 - \nu_0 K_t) / (1 + K_t / -\nu) \quad (5)$$

Eşitlikte, CF; kalibrasyon faktörü, ν_0 Gerilme ölçerlerin Poisson oranı, (0.285), ν ; alüminyum kazığın Poisson oranı (0.33), and K_t ; hassaslık katsayısı (0.004)'dir.

3. 3. Zemin Modeli

Zemin mekaniği problemlerinde gerçekçi ve güvenilir tasarımlar yapabilmek için zeminin kayma mukavemeti değişkenlerinin bilinmesi ve bu

değişkenlerin saptanmasında kullanılacak zemin modelinin seçilmesinin önemi büyüktür. Bu çalışmada kullanılan Şile kumuna ilişkin kayma mukavemeti parametreleri üç eksenli basınç deneyleri ile elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilen eşitlikteki hiperbolik zemin modeli kullanılarak değerlendirilmiştir.

$$E = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\phi + 2\sigma_3\sin\phi} \right]^2 KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (6)$$

Zeminin doğrusal olmayan karakterini yansıtabilen Hiperbolik zemin modeli (Kodner, 1963) tarafından ortaya konmuş ve (Duncan ve Chang, 1970) tarafından geliştirilmiştir. Eşitlikte yer alan, σ_1 ; büyük asal gerilme ve σ_3 ; küçük asal gerilme, E, elastik modül, ϕ ; içsel sürtünme açısı, c; kohezyon, R_f ; kırılma oranı, K ve n; elastic modül katsayısı ve P_a ; atmosfer basıncıdır. Üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 4. Üç eksenli basınç deneyi sonuçları.

Dr (%)	σ_3 (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	E_i (kPa)	R_f	ϕ^0
45	100	385	55320	0.907	32
	200	910	91460	0.731	
60	100	555	68240	0.724	36
	200	909	118650	0.774	
75	100	625	84970	0.762	39
	200	1000	174480	0.777	
85	100	678	100660	0.786	43
	200	1120	197800	0.685	

4. ANALİZLERDE KULLANILAN YAZILIMLAR

4. 1. LPILE 4.0

LPILE programı yanal yüklü kazıklar için daha önceleri kullanılmakta olan COM64 yazılım programının geliştirilmiş bir versiyonudur ve özel olarak yanal yüklü kazıkların tasarımı için kullanılmaktadır. p-y eğrileri metodu ile kazık tasarımı yapılan LPILE programı sonlu farklar yöntemini kullanarak analizlerini gerçekleştirir. Tasarımcı tarafından tanımlanan zemin özelliklerine göre program otomatik olarak "p-y" eğrileri oluştururken, istendiği durumda tasarımcıya kendi eğrilerini kullanma imkanı sağlayabilmektedir. Kazık başlığına düşey, yanal ve moment yükleri uygulanabilmekte ve zemin tabakalı olarak modellenabilmektedir. Kullanım kolaylığı ve görsel

analizleri nedeniyle LPILE diğer yazılımlara göre üstünlükleri olan bir programdır.

4. 2. SAP 2000

SAP2000 programı inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapan genel bir tasarım programıdır. Bu çalışmada yatak katsayısı yöntemi zeminin sonsuz elastik yaylarla modellenmesi prensibinden hareketle SAP2000 programından yararlanılmıştır. Bilgisayar yazılımlarında zemine ve kazık modeline ilişkin Tablo 5’ te verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 5. Yazılımlarda kullanılan kazık özellikleri.

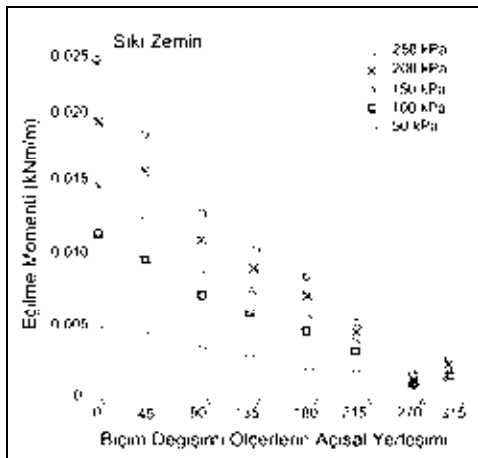
Kazık uzunluğu	0.7 m
Kazık çapı	0.022 m
Kazığın atalet momenti	$4.4 E^{-9} m^4$
Kazık kesitinin alanı	$8.14 E^{-5} m^2$
E_p (Alüminyum kazık)	$6.9 E^7$ kPa
Yükleme biçimi	Statik
Yükleme adımları	0.01 – 0.15 kN

Yapılan üç eksenli basınç deneyinin sonuçları göz önünde tutularak, analizlerde kullanılan zemin değişkenleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Analizlerde kullanılan zemin değişkenleri.

	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
Dr	% 55	% 65	% 80
γ_k (kN/m ³)	16.5	17.5	18.5
ϕ (°)	32	35	39
e_{50}	0.01	0.01	0.01

Oluşturulan Sap 2000 modeli ve modelleme aşamaları Şekil 6’da özetlenmektedir.



Şekil 6. Sap2000 modelleme adımları.

Alüminyum içi boş bir boru modelinde tanımlanan kesitte elastik yay katsayıları Tablo 1’de belirtilen n_h sabitleri kullanılarak oluşturulmuştur. Gevşek, orta sıkı ve sıkı zeminler için n_h sabitleri sırası ile ; 2000, 6000 ve 20000 olarak alınmıştır. Modelin ve deplasman büyüklüklerinin çok küçük olması nedeni ile deforme olmuş kazık kesiti görsel olarak gösterilememiştir. Ancak kazık kesitinde oluşan yer değişimleri ve eğilme momenti büyüklükleri tablolar halinde elde edilmiştir.

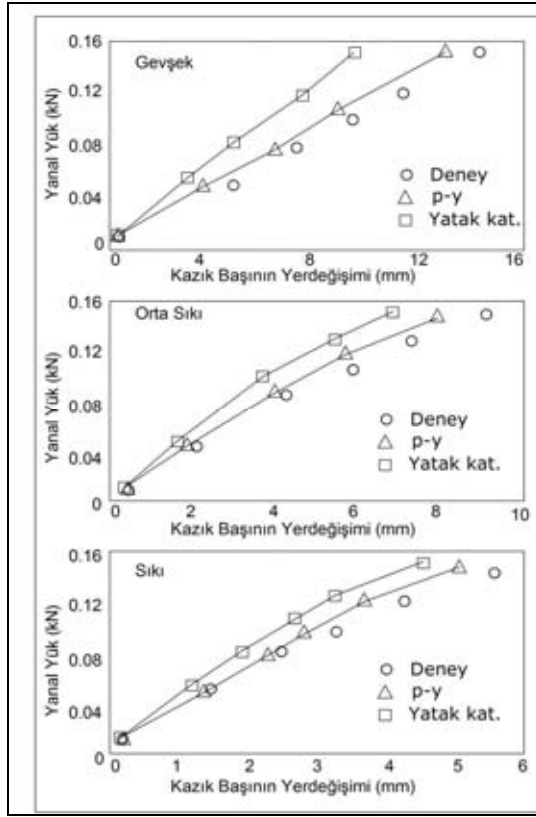
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRMASI

Yanal yüklü bir tekil kazığın davranışının incelendiği bu çalışma şu adımlarda gerçekleştirilmiştir.

- Deney kutusunun tabanına yağmurlama sistemi kullanılarak 15 cm kalınlığında dolgu malzemesi yerleştirilmiştir.
- Kutuyu tam ortalayacak şekilde alüminyum model kazık konumlandırılmış ve kutu köşegenlerinden sabitlenerek dolgu malzemesinin yerleşimi tamamlanuncaya kadar dikey konumda kalması sağlanmıştır.
- Kazık iç çeperindeki gerilme ölçerler ile veri toplayıcı kart arasındaki bağlantıyı kuran kablolar bilgisayar donanımına takılarak okuma kontrolü yapılmıştır.
- Yağmurlama sisteminin elek bölümüne amaçlanan sıklık yüzdesini sağlayacak elek tabloları sürülerek düzenek hazırlanmış ve yağmurlama haznesine kum beslemesi yapılmıştır. (Kutu doluncaya kadar haznedeki kum seviyesinin sabit kalması için sürekli olarak kum takviyesi yapılmıştır)
- Dolgu malzemesi yerleşimi tamamlandıktan sonra yanal yük uygulayacak olan yükleme düzeneği ile kazık başı arasındaki bağlantılar yapılmış ve kazık başlığına yanal ötelenmeyi ölçecek olan doğrusal pozisyon ölçer yerleştirilmiştir.
- Gerilme ölçerlerin son kalibrasyonları yapılmış ve ilk okumaları alabilmeleri için bütün değerleri sıfırlanmıştır.

Şekil 2’de görüldüğü gibi bir makara yardımı ile etkiltilen yanal tekil yükler sırasıyla 0.01, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.15 kN büyüklüklerinde kademeli olarak uygulanmıştır. Her yükleme adımında 5’er dakika beklenerek yanal yükün zemine tamamen aktarılması amaçlanmış ve okumaların sağlıklı alınması sağlanmıştır.

Gevşek, orta sıkı ve sıkı zemin ortamlarında yapılan yanal yüklü deneylerde kazık başınının yer değişimi Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Kazık başınının yer değişimi.

Beklendiği gibi yanal yük etkisinde kalan tekil kazık gevşek zemin ortamında, sıkı zemin ortamına kıyasla daha fazla yer değişimi göstermiştir. Şekilde grafik olarak gösterilen kazık başınının yer değiştirme büyüklükleri Tablo 7'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

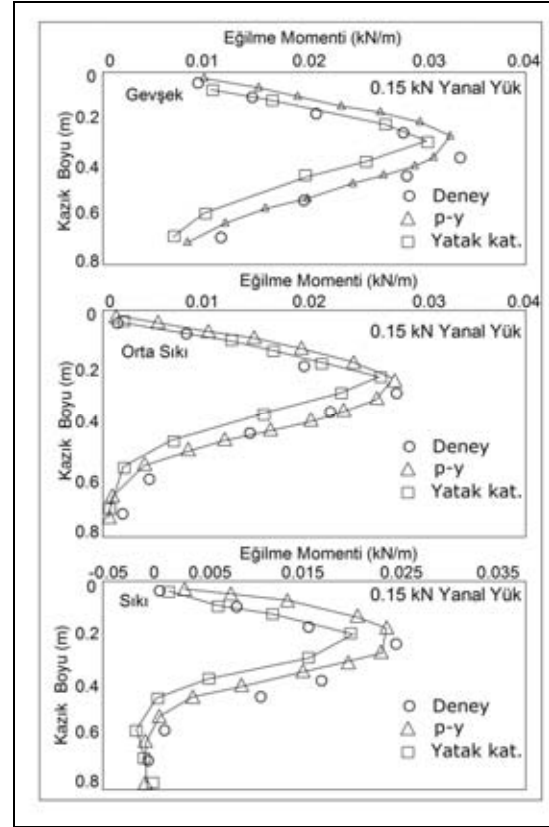
Tablo 7. Kazık Başınının Yanal Yer Değiştirmesi.

Zemin	Deneysel	p-y	Yatak Kat.
Gevşek	14 mm	12.9 mm	9.10 mm
Orta Sıkı	9.12 mm	7.9 mm	6.6 mm
Sıkı	5.6 mm	5.05 mm	4.7 mm

Bununla birlikte gevşek zemin ortamında meydana gelen yer değişimleri doğrusal bir eğimde dağılım gösterirken, sıkı zemin ortamında meydana gelen yer değişimleri doğrusal olmayan (hiperbolik) bir dağılım sergilemektedir. Bu durum sıkı zeminin yanal yük etkisinde kalan kazığa karşı gösterdiği zemin reaksiyonundan ileri geldiği düşünülmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi p-y ve yatak katsayısı yöntemleri ile elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen ölçümler birbirleri ile

oldukça uyum göstermektedir. Bununla beraber büyük yer değiştirmelerin olduğu durumlarda yatak katsayısı daha az güvenilir sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu bakımdan küçük yer değiştirmelerin bulunduğu (sıkı zemin ortamları ve düşük yükleme adımlarında) yatak katsayısı yöntemi doğru sonuçlar verebilmektedir.

Kazık boyunca yapılandırılan gerilme ölçerlerden alınan veriler ışığında elde edilen eğilme momenti dağılım grafikleri Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Eğilme momentlerinin dağılımı.

Şekil 8'den görüldüğü gibi en büyük eğilme momentinin meydana geldiği kazık kesiti derinliğinin, zeminin sıklık derecesi ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Zemin sıklığı arttıkça en büyük eğilme momentinin meydana geldiği nokta kazık başına yaklaşmaktadır. Söz konusu değişim Tablo 8'de rakamsal olarak verilmektedir.

Tablo 8. Kazıkta oluşan en büyük eğilme momentini.

Zemin	Kazık Derinliği	Maks. Moment
Gevşek	0.37 m	0.033 kNm
Orta Sıkı	0.27 m	0.249 kNm
Sıkı	0.14 m	0.19 kNm

Bu durum uzun kazıkların yanal yük etkisinde ortaya koydukları plastik mafsal benzeri davranışını temsil etmektedir. Yanal yük etkisinde kalan tekil bir kazık davranışının daha detaylı gözlemlenebileceği bir başka değerlendirme, kazık kesiti boyunca zemin reaksiyonunun nasıl bir dağılım gösterdiğinin saptanmadır. Bu amaçla, deneylerden elde edilen veriler çerçevesinde 0.15 kN yanal yük altında p ve y parametreleri, aşağıdaki verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir.

$$p = \frac{d^2 M(x)}{dx^2} \quad (7)$$

$$y = \iint \frac{M(x)}{EI} dx \quad (8)$$

Burada; M , eğilme momenti olup; Şekil 8'den elde edilmesinde kullanılmıştır ve;

$$M = \varepsilon \frac{EI}{r} \quad (9)$$

eşitliği ile saptanır. Burada; M eğilme momenti E kazığın Elastisite modülü, I ; atalet momenti, ε şekil değişimi ve r kazığın dış çapıdır. Eşitliklerden elde edilen zemin reaksiyonu gerilme ölçerlerin yerleştirildiği noktalar dikkate alınarak Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 9. Zemin reaksiyonları.

Kazık Derinliği	Zemin Reaksiyonu (kNm)		
	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
100 mm	-0.061	-0.074	-0.068
200 mm	-0.833	-1.268	-1.948
300 mm	-0.781	-0.769	-0.632
400 mm	-0.451	0.016	0.631
500 mm	0.022	0.580	0.482
600 mm	0.547	0.489	0.294
700 mm	0.755	0.094	0.237

Tablo 8'den görüldüğü gibi zemin sıklığı arttıkça dolgu malzesinden kazık kesitine etkiyen reaksiyon kuvveti artmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada düşey olarak yerleştirilmiş tekil bir kazığın yanal yükler altındaki davranışı çok yönlü olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan Şile kumu üzerinde üç eksenli basınç deneyleri, X-Ray deneyleri ve mikroskopik fotoğraflama çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmada yanal yüklü kazık davranışının aydınlatılabilmesi için doğrusal

pozisyon ölçer ve gerilme ölçerler kullanılmıştır. Elektronik veri akışı ile veri alan ölçüm aygıtları deney başlangıcında kalibre edilmiştir. Kalibrasyon için kullanılan yöntemin oldukça başarılı olduğu saptanmıştır. Deney kutusunun sınır koşulları, yükleme adımları zemin ve kazık özellikleri LPILE ve Sap2000 programlarında modellenerek analizleri yapılmış deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında kazık davranışının kestiriminde p - y yönteminin yatak katsayısı yöntemine göre daha güvenilir analizler yaptığı anlaşılmaktadır.

Farklı kum sıklıklarında gerçekleştirilen deneylerde, zemin sıklığının kazık davranışında etkili olduğu görülmüştür. Sıklık derecesi arttıkça kazıkta oluşan yerdeğişmelerin azaldığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında farklı aralıklarda ve şekillerde yerleştirilen grup kazıklarının davranışı incelenecektir. Diğer yandan zemin-yapı etkisinin üç boyutlu değerlendirmesinin yapılabilmesi adına, çalışmalar üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri üzerinde yoğunlaşacaktır.

7. KAYNAKLAR

Adalier, K. 1992. Post-Liquefaction behavior of soil systems. Ms Thesis. Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, N.Y.

Broms, B. 1964. The lateral resistance of piles in cohesive soils. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 90, pp. 27-63.

Brown, D. A. Morrison, C. and Reese, L. C. 1988. Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 114 (11).

Daley, J. W. and Riley, W. F. 1978. Experimental strain analysis. McGraw-Hill; New York.

Duncan, J.M. and Chang, C.Y. 1970. "Nonlinear analysis of strain and stress in soils." Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the ASCE. pp 1629-1653.

Fan, C.C., Long, J. H. 2005. Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand. Computers and Geotechnics. (32) 274-289.

Franke, E. 2001. Group action between vertical piles under horizontal loads deep foundations on Bored and Auger Piles., W.F. Van Impe A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Gültekin, S., 2001. Yatay yüklü düşey kazıkların laboratuvar koşullarında modellenmesi ve hesap esasları. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Huang, A.B. and O'Neill M.W. 2003. Comparative behavior of laterally loaded groups of bored and driven piles in cohesionless soil." Proc. of 13th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. pp. 718-725.

Kayıs, G. 2006. Yanal yüklü kazık davranışının arazi ortamında incelenmesi. Yüksel Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. İstanbul.

Kodner, R.L. 1963. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. J. Soil Mech. Found. Div. pp. 115-143.

Kumar. S., Lalvani, L. 2004. Lateral Load Deflection Response of Drilled Shafts in Sand. EI (I)

Journal CV. Matlock H, Reese L. C. 1960. Generalized solutions for laterally loaded piles. J Soil Mech Found Div – ASCE;86(5):63-91.

Mokwa, R. L. and Duncan, J. M. 2001. "Laterally loaded pile group effects and p-y Multipliers," ASCE Geotechnical Special Publication No 113, pp. 728-742.

Terzaghi, K. 1955. "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction," Journal of Geotechnique, Vol. 5, 297-326.

Neill, O., Murchison, J.M. 1983. "An evaluation of p-y relationships in sands". Research Report No. GT-DF02-83, Department of Civil Engineering, University of Houston.

Parakash, S. 1962. Behavior of pile groups subjected to Lateral Loads., PhD Thesis. Univ. of Illinois, Urbana.